



**Universidad
Zaragoza**

Máster Oficial en Energías Renovables y Eficiencia Energética

Trabajo Fin de Máster

Estudio, diseño y adaptación de una planta de gasificación en lecho
fluido para carbones de bajo rango con alto contenido en cenizas

Autor

José Mario Torrico Aguilar

Director

Javier Pallarés Ranz

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Noviembre de 2011

Agradecimientos

Saludar el esfuerzo de la Universidad de Zaragoza y el Banco Santander por apoyar y promover las becas de doctorado para estudiantes Latinoamericanos, de la cual formo parte.

Académicamente, agradecer el apoyo que siempre he tenido de mi director de Trabajo de Fin de Máster, Javier Pallarés, sin cuya contribución esta tesis no sería lo que es, y a Susana Martínez por su colaboración y revisión.

Estudio, diseño y adaptación de una planta piloto de gasificación en lecho fluido para carbones de bajo rango con alto contenido en cenizas

Resumen

El objetivo del presente trabajo es el estudio, diseño y adaptación de la planta piloto de gasificación en lecho fluido burbujeante de 10 kW_{th} del CIRCE para el proceso de gasificación de carbones de bajo rango. El análisis se ha centrado en el estudio del rango de condiciones de operación para la gasificación extraídas de la bibliografía de plantas piloto, determinando los ratios molares de vapor, oxígeno o aire como agentes gasificantes, calculando los caudales de entrada, la temperatura de operación y finalmente se estiman los ratios óptimos de funcionamiento mediante la aplicación de herramientas de simulación. Se verifico la capacidad fluidodinámica de cada simulación evaluando el régimen de flujo para contacto gas-sólido (Diagrama de Grace) y los ratios mínimos de operación (U_g/U_{mf} y U_g/U_t). A partir de los resultados se plantearon modificaciones en la operación y en la composición de los agentes gasificantes, para garantizar el flujo burbujeante. Finalmente, se ha propuesto en función al caudal de los agentes gasificantes un equipo para la generación de vapor y un sistema de suministro de oxígeno.

Entre las alternativas propuestas para garantizar el régimen burbujeante se hallan: la reducción del ϕ_p , el uso de gases inertes, incrementar la T_r , incrementar el ratio SC y elevar el caudal de combustible. Solo las dos últimas alternativas mejoran sustancialmente los parámetros de fluidización y permiten alcanzar el régimen burbujeante; por lo que se combinan ambas alternativas para garantizar la fluidización y gasificación del carbón. En base al estudio paramétrico, se ha llegado a la conclusión que la mejor alternativa es aumentar el caudal de combustible en 50% (1,558 kg/h) e incrementar el ratio molar SC a 1,6; esta última responsable de la disminución del PCI del gas resultante.

Hallados los caudales de entrada de los agentes gasificantes se realiza la selección de equipos para la generación de vapor y el suministro de oxígeno mediante cilindros.

Palabras clave: gasificación, carbón de bajo rango, lecho fluido.

Contenido

1. Introducción.....	6
2. Teoría de gasificación	8
2.1. Tipos de gasificadores.....	9
2.1.1. Lecho fluido burbujeante (BFB)	10
2.2. Proceso de gasificación y reacciones	11
2.3. Agente gasificante	12
3. Modelo de gasificación.....	13
3.1. Consideraciones preliminares.....	13
3.1.1. Criterios generales de diseño	14
3.1.2. Fluidodinámica.....	14
3.1.2.1. Parámetros de fluidización.....	14
3.2. Adaptación del modelo al caso	16
3.2.1. Consideraciones generales sobre la adaptación	16
3.2.2. Modificaciones en el modelo	17
3.2.2.1. Ratio OC.....	17
3.2.2.2. Ratio SC	18
3.3. Aplicación del modelo para el análisis de viabilidad técnica.....	18
3.3.1. Objetivos del análisis.....	18
3.3.2. Definición de parámetros de análisis.....	18
4. Resultados y discusión.....	20
4.1. Reducción del ϕ_P	21
4.2. Gasificación con inerte.....	25
4.3. Incrementar caudal de vapor	26
4.4. Incrementar la temperatura del reactor	27
4.5. Incrementar el flujo de alimentación de combustible	28
4.6. Incrementar el flujo de alimentación de combustible y ratio de vapor SC.....	30
5. Selección de equipos	31
6. Conclusiones.....	33

Anexos	35
A. Tipos de gasificadores	36
B. Planta de gasificación de 10 kW _{th} CIRCE	41
C. Procesos de gasificación	43
D. Estructura y principios del modelo	45
E. Fundamento teórico	47
F. Regímenes de fluidización	50
G. Resultados	51
H. Selección de equipos	53
Referencias	55

Nomenclatura

C_p	calor específico a presión constante (kJ/kmol·K)
d^*	diámetro estrella (m)
d_p	diámetro de partícula (m)
e_{mf}	fracción vacía de mínima fluidización ()
ER	ratio de equivalencia de oxígeno estequiométrico ()
g	gravedad (m/s ²)
h_f^0	entalpía de formación en (kJ/mol)
k_e	constante de equilibrio ()
l_{lecho}	longitud lecho (m)
l_{mf}	longitud de mínima fluidización (m)
M_f	flujo másico de combustible (kg/h)
M_{fs}	flujo másico de vapor sobre flujo másico de combustible (kg/kg)
OC	ratio oxígeno sobre carbono (kmol/kmol)
PCI	poder calorífico inferior (kJ/kg)
PCS	poder calorífico superior (kJ/kg)
R	constante universal de gases (kJ/kmol·K)
Re	número adimensional de Reynolds relativo a una partícula en lecho fijo ()
Re_{mf}	número adimensional de Reynolds relativo al comienzo de la fluidización ()
SC	ratio vapor sobre carbono (kmol/kmol)
T_r	temperatura reactor (K)
U_g	velocidad del gas (m/s)
U^*	velocidad de partícula estrella (m/s)
U_t	velocidad terminal (m/s)
U_{mf}	velocidad de mínima fluidización (m/s)
ΔG_0	energía libre de Gibbs (kJ/kmol)
ΔP_{lecho}	caída de presión en lecho (Pa)

Letras griegas

σ	Constante Stefan-Boltzmann (W·m ⁻² ·K ⁻⁴)
ρ_g	densidad de gas (kg/m ³)
ρ_p	densidad de partícula (kg/m ³)
ϕ_p	diámetro de partícula (m)
ϵ_{lecho}	fracción vacía de lecho ()
μ_g	viscosidad de gas (kg/s·m)

1. Introducción

Actualmente, el Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE) cuenta con una planta piloto de gasificación de lecho fluido de 10 kW_{th} diseñado para estudiar el reciclado de plásticos mediante el proceso de gasificación, que está en operación desde Junio del presente. El centro tiene especial interés por ampliar el campo de estudios a carbones de bajo rango con alto contenido en cenizas que presentan dificultades de transformación en centrales de carbón pulverizado y que podrá en un futuro próximo suplir gran parte de la generación eléctrica y de aplicación en motores de explosión especialmente en países con grandes reservas de lignito y carbón sub-bituminoso como la India y Australia. La importancia del uso de estos carbones radican en las reservas mundiales probadas de carbón, que de 860 billones de toneladas, el 30% es sub-bituminoso y el 23% lignito; y a medida que las reservas de petróleo y gas natural se agotan, la gasificación de carbón puede emerger como un proceso vital alternativo.

En la actualidad la tecnología de gasificación para generación eléctrica está asociada con grandes centrales de carbón IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) y a pequeña escala con gasificadores de biomasa, donde los reactores de lecho fijo y flujo arrastrado son dominantes. Los proyectos a escala industrial de IGCC en operación trabajan en su totalidad con flujo arrastrado, actualmente hay doce plantas en operación de ciclo combinado integradas a sistemas de gasificación: ELCOGAS (Puertollano, España) de 335 MW_e, DEMKOLEC (Buggenum, Holanda) de 253 MW_e, Wabash River (Indiana, USA) de 262 MW_e, Nakoso (Japón) de 220 MW_e, El Dorado (Kansas, USA) de 262 MW_e, Tampa Electric (Florida, USA) de 250 MW_e, Piñon Pine (Nevada, USA) de 100 MW_e, Shell Per (Rotterdam, Holanda) de 115 MW_e, Api Energía (Falconara, Italia) de 244 MW_e, Isab Energy (Sicilia, Italia) de 521 MW_e, Sarlux (Sardina, Italia) de 452 MW_e, SVZ Sustec (Pumpe, Alemania) de 45 MW_e.

El inconveniente de trabajar con carbones de bajo rango es el aglomerado y sinterizado de las cenizas, en especial cuando la fusión ocurre a baja temperatura (<1200°C) y que es capaz de generar una espesa capa en el interior del reactor disminuyendo la eficiencia de transferencia de calor y obstruyendo la sección útil del reactor, que se refleja un mayor tiempo de paradas por limpieza y obstrucción. La ventaja de la gasificación en lecho fluido burbujeante radica en la baja temperatura de operación (<900°C), ideal para evitar la aglomeración y sinterizado de cenizas, problema asociado a los carbones de estudio que causan problemas en la limpieza de los gases de salida, pero al mismo tiempo facilitan su manejo dentro del material del lecho inerte [1]. Otras ventajas de la gasificación en lecho fluido es el incremento de la eficiencia de transformación de las materias primas carbonosas

en gases de salida convenientes, que también reduce también las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [2]; y su capacidad de utilización del alto contenido en cenizas (>40%) como material inerte en el interior del reactor gasificador [3].

Actualmente el gasificador del centro utiliza aire como agente gasificante, sin embargo el diseño y la adaptación a carbones de bajo rango nos obliga a replantear el uso del gasificante por vapor y/o oxígeno para incrementar de esta manera el poder calorífico inferior (PCI) del gas de salida y disminuir los volúmenes de syngas.

El objetivo del trabajo es el estudio, diseño y adaptación de la planta piloto de gasificación en lecho fluido burbujeante de 10 kW_{th} del CIRCE para el proceso de gasificación de carbones de bajo rango, para ello es necesario estudiar el rango de condiciones de operación para la gasificación utilizando vapor, oxígeno o aire como agente gasificante, determinando caudales de entrada, temperatura de operación y estimar ratios óptimos de funcionamiento mediante la aplicación de herramientas de simulación. Se verifica la capacidad fluidodinámica de cada simulación evaluando el régimen de flujo para contacto gas-sólido y los ratios mínimos de operación. A partir de los resultados se plantean modificaciones en la operación y en la composición de los agentes gasificantes, para garantizar el flujo burbujeante. Finalmente, se propondrá en función al caudal de los agentes gasificantes un equipo para la generación de vapor y un sistema de suministro de oxígeno.

La adaptación lleva consigo una revisión bibliográfica exhaustiva de la problemática de los carbones de bajo rango, así como las experiencias en plantas industriales y piloto que se dispongan para estudiar el proceso y simular el proceso de gasificación para dimensionar los equipos. Estas modificaciones deben tomar en cuenta los requerimientos técnicos de operación ya que el siguiente pasó al TFM es la realización de las modificaciones diseñadas. Primeramente, se identifican en base a plantas piloto existentes, los rangos de operación habituales en proporciones de combustible, vapor, aire u oxígeno. Luego, es necesario realizar ajustes al programa de simulación de gasificación para el uso de múltiples agentes gasificantes y poder estimar el comportamiento del gasificador dentro de este rango definido en bibliografía.

La simulación contempla el estudio paramétrico que implica la simulación de diversos escenarios de gasificación, variando la proporción y los agentes gasificantes. La parametrización nos permite obtener los límites de operación y validar la capacidad fluidodinámica de cada simulación realizada, tomando en cuenta las características físicas actuales del gasificador (tornillos de alimentación, diámetro y altura del reactor), temperatura de gasificación y modificando los caudales de los agentes gasificantes (vapor, oxígeno o

aire). Para determinar los regímenes de operación del proceso de gasificación estudiamos las características de fluidización: U_g , U_t , U_{mf} , además de los ratios para lechos fluidos U_g/U_{mf} y U_t/U_{mf} . Para garantizar el régimen de lecho fluido burbujeante se evalúan los resultados de d^* y U^* en el diagrama Grace de régimen de flujo para contacto gas-sólido.

Para aquellos rangos de operación que no alcanzan el régimen de flujo burbujeante o los ratios mínimos de fluidización, se plantean alternativas de mejora, que van desde la variación de las proporciones de agentes gasificantes, el incremento de la temperatura del reactor, uso de agentes inertes, disminución del ϕ_p o mayor caudal de combustible. Determinados los regímenes de operación donde se comprueba la gasificación en lecho fluido burbujeante, se estiman las necesidades mínimas de suministro de agentes gasificantes.

El presente TFM se compone de cinco capítulos, en el apartado 2 se presenta un resumen de la teoría de gasificación y la clasificación por tipo de gasificador, con especial énfasis en lechos fluidizados. A continuación, se describe la planta de gasificación de 10 kW_{th} del CIRCE que será objeto de simulación y adaptación para la gasificación de carbones de bajo rango.

El capítulo 3, describe el modelo de simulación del proceso de gasificado en lecho burbujeante dividido en módulos, introduciendo nociones sobre el equilibrio químico termodinámico cero dimensional, los balances de masa y energía, además de las premisas para la simplificación del modelo. Finalmente, se exponen los parámetros de funcionamiento y sus rangos de simulación.

El capítulo 4, muestra los resultados de la parametrización y el efecto del caudal de los diferentes agentes gasificantes en la capacidad fluidodinámica y en la gasificación de la materia prima carbonosa. A partir de los resultados, se evalúan cinco alternativas para mejorar la calidad de fluidización de los escenarios donde no se logre el régimen burbujeante.

Finalmente, el capítulo 5 indica las conclusiones del estudio y se exponen los caudales normales de los agentes gasificantes que son necesarios para asegurar el régimen burbujeante en los rangos de operación estudiados.

2. Teoría de gasificación

La gasificación es un proceso que transforma la materia orgánica y fósil (basados en compuestos carbonosos) en monóxido de carbono, hidrógeno, dióxido de carbono y metano.

Esta transformación se alcanza al reaccionar estos materiales a elevada temperatura ($>700^{\circ}\text{C}$) sin combustión, con un caudal controlado sub-estequiométrico de oxígeno y/o vapor. El gas resultante es llamado syngas o gas de síntesis y es considerado una fuente de energía renovable. El calor se genera mediante reacciones exotérmicas entre el oxígeno y el combustible que sirven para mantener la temperatura de operación del gasificador y que permiten que otras reacciones endotérmicas se lleven a cabo. Una alternativa es la utilización de vapor como único agente gasificante, solo si otra fuente externa provee el calor suficiente para las reacciones endotérmicas necesarias. La gasificación del carbón ofrece algunas ventajas sobre la combustión directa, por ejemplo: para una misma cantidad de combustible el gas obtenido es mucho menor comparado con los sistemas de combustión. Este volumen reducido de los gases de salida, requiere equipos de menor tamaño, por lo tanto menores costos de inversión. Para tamaños medios de capacidad instalada y sistemas aislados la inversión es menor comparado con los sistemas de combustión. Una de las desventajas de la gasificación es que rara vez alcanzan el 100% de eficiencia de conversión, por eso parte de la energía del combustible se mantiene remanente como char. A esto se suma las aplicaciones de gas frío, donde el gas de síntesis puede ser transformado en combustibles líquidos transportables (y almacenables) o utilizado en la fabricación química y de fertilizantes, donde el calor sensible del gas es cedido al ambiente, a no ser que se utilice un sistema de recuperación de calor.

El gas obtenido del proceso de gasificación puede ser utilizado como combustible de sistemas de generación en ciclo combinado. La combinación del gasificador y los ciclos combinados es llamada IGCC, sistema capaz de generar grandes reducciones en GEI debido a los mayores rendimientos cuando se compara con sistemas de generación eléctrica tradicionales a partir de combustión directa de carbón. La cantidad de CO_2 generado en la gasificación de carbón es menor que en el sistema pulverizado y superior al ciclo combinado de gas (0,77-0,68-0,66 kg CO_2/kWh respectivamente), la emisión de GEI en gasificación es claramente menor que en pulverizado, debido principalmente al mayor rendimiento de conversión de carbón. Las IGCC pueden alcanzar una eficiencia cercana al 40%, por encima de la eficiencia de centrales de carbón pulverizado (34%). La eficiencia objetivo para los sistemas de IGCC prevista para el Departamento de Energía (DOE) es de 52% en poder calorífico superior (PCS), muy por encima de la eficiencia probada para centrales de carbón supercríticas (aprox. 40%).

2.1. Tipos de gasificadores

Por la disposición de los sistemas de alimentación y la trayectoria del combustible (partículas) dentro el reactor, los gasificadores pueden ser divididos en:

- a) Lecho arrastrado
- b) Lecho fluidizados
- c) Lecho fijo (updraft y downdraft)

La tabla siguiente presenta los parámetros de operación de diferentes tipos de gasificadores:

Tabla 1
Comparación de gasificadores

Parámetro	Lecho fijo	Lecho fluidizado	Lecho arrastrado
Tamaño de partícula	< 50 mm	< 6 mm	<0,15 mm
Tolerancia a aglomeración	Muy buena	Buena	Pobre
Temp. salida de gases (°C)	450-650	800-1000	>1260
Tolerancia alimentación	Carbones de bajo rango	Carbones de bajo rango y biomasa	No carbón de bajo rango, no biomasa
Temp. zona de reacción (°C)	1090	800-1000	1090
Requerimiento de vapor	Alto	Moderado	Bajo
Producción de ceniza	Seca	Seca	Húmeda
Eficiencia de gas frío	80%	89%	80%
Problemas	Producción de tar y utilización de finos	Conversión de carbón	Enfriamiento del gas de salida

Los lechos fijos tienen una mala distribución de temperaturas y no son útiles para procesar fuel con alto índice de craqueo, ya que el tar se aglomera en zonas de baja temperatura y en ausencia de aire. El gas producto de los lechos fijos se utiliza para combustión directa sin tratamiento. Los procesos de gasificación circulante presentan las eficiencias más altas pero requieren menor ϕ_p . A continuación se explican características del lecho fluido burbujeante; para otros tipos de gasificadores ver anexo A.

2.1.1. Lecho fluido burbujeante (BFB)

Su fabricación data de 1926 y presenta una mayor simplicidad comparada con los lechos circulantes. En general los lechos fluidizados burbujeante presentan buena

mezcla y una temperatura de gasificación homogénea, trabaja con la inercia térmica del material inerte del lecho. Es posible alcanzar niveles de tar menores y evitar aglomeraciones.

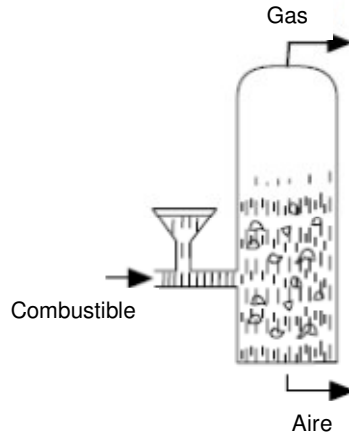


Figura 1

Gasificador de lecho burbujeante

El reactor tiene forma cilíndrica y está dividido en dos zonas con diferentes secciones: la primera zona es el lecho inerte (formado por arena) por donde se alimenta el carbón y se llevan a cabo los cuatro procesos de la gasificación (secado, combustión, devolatilización y gasificación), por encima del lecho se halla el freeboard que donde ascienden los gases y garantiza la altura mínima para la retención del carbón que aún no ha gasificado. La alimentación de combustible se lleva a cabo por encima del plato distribuidor, formado por picos que distribuyen el agente gasificante en toda la sección del gasificador, garantizando la fluidización homogénea.

Tamaño máximo $25 \text{ MW}_{\text{th}}$ y $\phi_p < 10 \text{ mm}$. La temperatura de lecho es menor a 900°C para evitar aglomeración de cenizas. Una alternativa es el HTW (high temperature Winckler), que trabaja a mayor temperatura, pero por debajo del sinterizado. La velocidad de fluidizado es cercana a 1 m/s y su retorno es menor al del CFB.

El anexo B, describe la planta de gasificación de $10 \text{ kW}_{\text{th}}$ del CIRCE, sobre el que se modela el proceso de gasificación.

2.2. Proceso de gasificación y reacciones

En un proceso de gasificación típico, el gas de síntesis está formado por CO , H_2 , CH_4 , CO_2 y H_2O ; que son producto de los procesos fisicoquímicos siguientes:

Tabla 2

Procesos fisicoquímicos de gasificación

Proceso	Rango de temperatura (°C)
1) Secado	>150
2) Pirolisis y devolatilización	150 – 700
3) Combustión	700 - 1500
4) Gasificación del char	800 - 1100

Los procesos 1,2 y 4 absorben el calor que proviene de las reacciones exotérmicas del proceso de combustión. En el proceso de secado, la humedad del combustible se evapora, para luego dar paso a la pirolisis, proceso que separa el vapor de agua, los líquidos orgánicos y los gases no condensables del char o del carbón sólido del combustible. La combustión oxida los componentes del combustible en reacciones exotérmicas, mientras que el proceso de gasificación reduce el combustible en gases mediante reacciones endotérmicas. El anexo C explica los tres últimos procesos.

2.3. Agente gasificante

La composición final del gas producido depende de los agentes gasificantes utilizados, en función a su proporción y volumen. Actualmente se operan con tres tipos de agentes:

- a) Gasificado con aire
- b) Gasificado con vapor
- c) Gasificado con oxígeno

La gasificación puede incluir a dos de los agentes anteriores, dependiendo del PCI del gas de síntesis y la composición requerida. El menor PCI se consigue con aire, donde el 50% del gas producido es nitrógeno, en menor proporción CO (20%) y H₂ (16%), este gas pobre únicamente puede ser utilizado para impulsión de motores y para su combustión en hornillas. La gasificación con aire representa el 70% de todos los gasificadores instalados.

La gasificación con oxígeno presenta el mayor PCI de gas producido y está libre de nitrógeno, sin embargo está por debajo del PCI del gas natural, además la energía para separar el oxígeno del aire es de 2,18 MJ/kg O₂. El gas producido está compuesto principalmente por 48% CO y 32% de H₂; que le permite ser utilizado como gas de síntesis y de combustión.

La gasificación con vapor tiene interés especial cuando lo que se quiere producir es H_2 (50%) y su aplicación es el gas de síntesis. Este proceso no es autotérmico, y en aplicaciones industriales va acompañado con otro agente gasificante.

El resumen del PCI esperado de los gases de salida en función del agente gasificante se muestra a continuación:

Tabla 3

Poder calorífico del gas producido en función del agente gasificante

Agente gasificante	PCI del gas (MJ/Nm ³)
Aire	4-7
Vapor	10-8
Oxígeno	12-28

3. Modelo de gasificación

3.1. Consideraciones preliminares

El modelo utilizado para el diseño y simulación del proceso es de equilibrio químico cero dimensional de gasificación en lecho fluido y fue elaborado por el Área térmica del CIRCE en el programa Engineering Equation Solver (EES) correspondiente a la planta de gasificación piloto de 10 kW_{th}. El modelo tiene la finalidad de simular el comportamiento del proceso de gasificación en función a las características constructivas de la planta piloto existente y de los rangos de operación utilizados. En función de los objetivos que se requieran, se puede modificar el modelo para re-diseñar el sistema de gasificación o para simular su comportamiento, únicamente modificando los parámetros de entrada y salida.

Para este proyecto se mantienen las consideraciones constructivas de la planta piloto actual y se considera el re-diseño del sistema de gasificación, incorporando dos nuevos agentes de gasificación: agua y vapor. También se consideran los nuevos rangos de operación para los agentes gasificantes, necesarios para simular el comportamiento.

El anexo D, presenta la descripción del modelo existente utilizado para la simulación de gasificación de residuos de plástico en lechos burbujeantes. A continuación se definen los criterios básicos de diseño y se explican las modificaciones realizadas al modelo de simulación. Finalmente, se describirá la estructura del análisis paramétrico con la

implementación de otros agentes gasificantes dentro de rangos de operación establecidos, cuyos resultados se explicarán en el capítulo siguiente.

3.1.1. Criterios generales de diseño

Los criterios básicos para la validación del diseño en orden de importancia son:

Definir el régimen fluidodinámico, para ello se determinan los valores característicos de d^* y U^* que nos permiten hallar el régimen de fluidización mediante el Diagrama de Grace o diagrama de contacto gas-sólido. El diagrama básicamente reconoce dos escenarios, el burbujeante y no burbujeante; para nuestro estudio buscamos que los parámetros que se hallen dentro la región burbujeante.

Determinar la U_{mf} , U_g y U_t con las que se calculan los ratios mínimos aconsejables de operación del gasificador: donde U_g/U_{mf} entre 2,5 y 3,5 es un estado límite de fluidización y recomendable mayor a 3,5 m/s. El ratio U_t/U_{mf} tiene un rango óptimo entre 10 y 90 veces y caracteriza al modelo por su capacidad de flexibilidad. Finalmente se debe verificar que U_g es menor a U_t .

El anexo E, explica los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo del modelo simplificado cero dimensional: química de la gasificación, balance de materia, balance de presión y balance de energía. A continuación, se explican los regímenes y parámetros de fluidización que validarán cada uno de los escenarios simulados.

3.1.2. Fluidodinámica

La fluidización en un lecho fluido es el proceso en el cual un conjunto de partículas solidas es capaz de comportarse como un fluido al ser impulsado por un gas o liquido corriente arriba en un reactor. La mayor de las ventajas de los lechos fluidizados es su capacidad de mezcla y reducido gradiente de temperatura, que los hace eficientes en pequeña y gran escala para procesos continuos. El anexo F, muestra los distintos regímenes de fluidización.

3.1.2.1. Parámetros de fluidización

Para reactores de lecho fluidizados burbujeante, la U_g debe ser menor a U_t y para partículas del tipo B de Geldart se recomienda que la velocidad sea 3,5 veces mayor que la U_{mf} . Para lechos pequeños, el rango óptimo se halla entre 2,5 a 3,5 veces la U_{mf} debido a la mayor probabilidad de aglomeración de burbujas en un

radio menor. Por debajo del límite es posible que no aparezcan burbujas y por encima del límite superior es posible la apariencia de slugging.

En un principio el material que se fluidiza es el inerte, por lo tanto la fluidización en un gasificador de lecho se estudia con las propiedades físicas del inerte que corresponde alrededor del 95-98% del volumen total del lecho. Es aconsejable, que el tipo de material del lecho este dentro el rango de partículas del grupo B en la clasificación de partículas de Geldart por peso y tamaño. El grupo B tiene una densidad en torno a 2.500 kg/m³ y se recomienda diámetros de partícula (ϕ_p) entre 90-700 μ m, similar a la arena de sílice.

Grace definió el diagrama de regímenes de flujo para contacto gas-sólido, que está relacionado con la clasificación de las partículas de Geldart. El diagrama de Grace se define en función de dos variables U^* y d^* :

$$d^* = d_{particula} * \left(\frac{\rho_{gas} * (\rho_{particula} - \rho_{gas}) * g}{\mu_{gas}^2} \right)^{0,3333} \quad (1)$$

$$U^* = U * \left(\frac{\rho_{gas}^2}{g * (\rho_{particula} - \rho_{gas}) * \mu_{gas}} \right)^{0,3333} \quad (2)$$

Para el caso de lechos fluidizados burbujeantes los valores de U^* y d^* deben estar acotados dentro el área de lechos fluidizados (bubbling beds) de la figura 2.

Conocido el régimen de fluidización, se estiman U_{mf} , e_{mf} y se calcula la U_t a partir de las siguientes ecuaciones:

$$U_{mf} = \frac{d_{particula}^2 * (\rho_{particula} - \rho_{gas}) * g * e_{mf}^3 * 0,78^2}{150 * \mu_{gas} * (1 - e_{mf})} \quad (3)$$

$$U_t = \left(\frac{4 * (\rho_{particula} - \rho_{gas})^2 * g^2}{225 * \rho_{gas} * \mu_{gas}} \right)^{0,333} * d_{particula} \quad (4)$$

$$e_{mf} = 0,58 * 0,78^{-0,7} * \left(\frac{\mu_{gas}^2}{d_{particula}^3 * g * (\rho_{particula} - \rho_{gas}) * \rho_{gas}} \right)^{0,029} * \left(\frac{\rho_{gas}}{\rho_{particula}} \right)^{0,021} \quad (5)$$

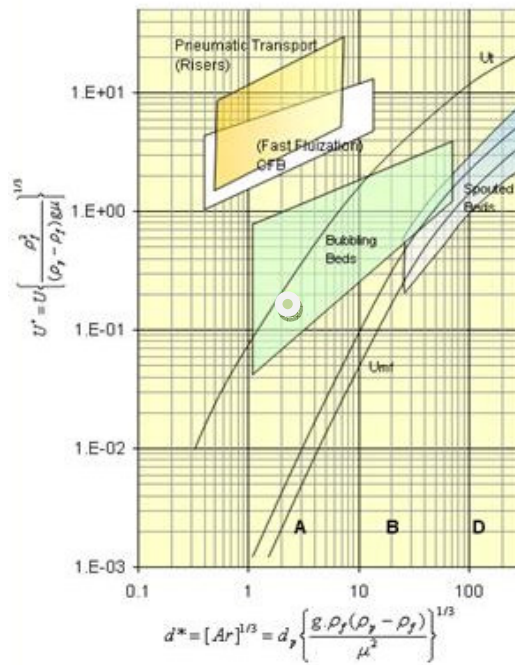


Figura 2

Diagrama de Grace: regímenes de flujo para contacto gas-sólido

Se verifican los que todas las velocidades se hallen dentro los rangos de diseño apropiado para gasificadores de lecho fluidizados:

$$\frac{U}{U_{mf}} = 2,5 - 3,5 \quad (6)$$

$$U_{mf} < U < U_t \quad (7)$$

$$\frac{U_t}{U_{mf}} = 10 - 90 \quad (8)$$

3.2. Adaptación del modelo al caso

3.2.1. Consideraciones generales sobre la adaptación

Para adaptar el modelo de gasificación en lecho fluido para plásticos con aire como único agente gasificante al modelo de gasificación en lecho fluido para carbones de bajo rango con vapor, oxígeno o aire como agentes gasificantes se realizaron modificaciones en el modelo de simulación a los siguientes módulos:

- a) Modulo químico de gasificación. Se posibilita la operación simultánea de dos agentes de gasificación: el oxígeno y vapor. Para el cálculo se definen los ratios siguientes, detallados en el capítulo 3.3.2: oxígeno/carbón (OC) y vapor/carbón (SC) a partir de datos bibliográficos. Desde este punto se divide la simulación en dos programas: la primera simulación con aire+vapor y la segunda de oxígeno+vapor como agentes gasificantes; para ambas se encuentran los flujos volumétricos de oxígeno, vapor y aire en condiciones normales. Se recalcula el oxígeno estequiométrico que se ve reducido por el aporte de vapor u oxígeno

como agente gasificante. Nuevamente se determinan los balances elementales añadiendo al azufre como componente de entrada y al dióxido de azufre como componente de salida.

- b) Modulo de balance de materia. Se ve afectado por la adición del dióxido de azufre como componente de salida y la inclusión de un nuevo balance de materia.

3.2.2. Modificaciones en el modelo

La inclusión del oxígeno y vapor como agentes gasificantes requieren adoptar nuevos rangos de operación para el modelo de simulación que se muestran en la tabla 6, que es un resumen de los ratios de gasificantes (SC, OC y ER) que se han utilizado en experimentos realizados en plantas piloto de gasificación en lecho fluidizados con uso combinado de agentes. Se determinan los valores máximos y mínimos para los ratios SC y OC, además de un ratio artificial que relaciona los dos agentes vapor/oxígeno (SO) y se confirman los rangos ER (0,20-0,40). Algunos datos de la revisión fueron estandarizados de kg vapor/kg fuel a kg vapor/kg C en base a una composición media del carbón de la India, que presenta un 42% de carbono. Algunos de los datos hallados en bibliografía presentan variaciones en las presiones de trabajo en el proceso de gasificación, en el tipo de combustible utilizado y en la mezcla de agentes gasificantes.

3.2.2.1. Ratio OC

El oxígeno es usado principalmente para proveer la energía necesaria para las reacciones de gasificación endotérmicas. La mayor parte de esta energía es generada a partir de la oxidación parcial o total del carbón:



Además de suministrar la energía para las reacciones endotérmicas de gasificación, el oxígeno debe ser capaz de entregar la energía para aumentar la temperatura de la alimentación a la temperatura del reactor, además de compensar la pérdida de calor por las paredes. En los sistemas autotérmicos, esta energía debe ser lo suficiente como para no requerir sistemas auxiliares para alcanzar la temperatura requerida del reactor. En el balance de energía de un gasificador, la mayor consideración es la determinar el ratio OC, tomando en cuenta las propiedades fluidodinámicas que son variables de su caudal.

3.2.2.2. Ratio SC

El vapor sobrecalentado puede ser utilizado como único agente gasificante o mezclado con aire u oxígeno.



La cantidad de vapor (M_{fs}), se conoce a partir del ratio molar SC.

$$M_{fs} = 18 * \frac{M_f C}{12} * SC \text{ kg vapor/kg fuel} \quad (12)$$

donde, C es la fracción de carbón en el combustible. El ratio SC tiene una influencia importante en la composición del producto, cuando este aumenta también lo hace el H_2 . Sin embargo, cuando el valor de SC es alto (>3) solo existe una ganancia marginal, además este exceso deja al proceso de gasificación sin reaccionar [3].

3.3. Aplicación del modelo para el análisis de viabilidad técnica

3.3.1. Objetivos del análisis

A partir de la recolección de datos experimentales de simulaciones y plantas piloto de gasificado en lecho fluido se construye la tabla 4 con rangos de OC, SC y ER, que serán evaluados en el programa de simulación, descartando los valores atípicos máximos y mínimos. La tabla presenta también, un resumen de valores de ER y temperaturas de gasificado. A partir de los resultados de las simulaciones se garantiza la viabilidad técnica de fluidización del lecho inerte y se definen los rangos de caudales típicos en los que la fluidización se halla en régimen burbujeante. Para los escenarios donde el régimen no se alcanza, se propondrán ciertas modificaciones en el sistema y sinergia de alternativas para alcanzar la zona burbujeante.

3.3.2. Definición de parámetros de análisis

Se confirma el rango de operación subestequiométrico de ER entre 0,20-0,40 tal como se había supuesto en un inicio para el modelo. Para el caso de gasificación con aire se suponen tres escenarios de 0,20 a 0,40 con un paso de 0,10. Ver tabla 5.

Tabla 4

Resumen de ratios ER, OC, SC y temperaturas de gasificación

Fuente	ER	OC ratio molar	SC ratio molar¹	S/O ratio molar	Temp. °C
[2]	0,2-0,3	<i>0,23-0,35²</i>			700-900
[10]	0,2-0,4	<i>0,23-0,47</i>			
[11]	0,2-0,3	<i>0,23-0,35</i>	0,8	<i>2,29-3,48³</i>	850
[3]	0,15-0,3	<i>0,18-0,35</i>			
[12]	0,2-0,3	<i>0,23-0,35</i>	0,47-1,42	<i>1,34-6,17</i>	
[13]	0,3-0,47	<i>0,35-0,55</i>	0,17-0,59	<i>0,31-1,69</i>	946-1026
[14]	0,3	<i>0,35</i>	1,35	<i>3,86</i>	
[15]	<i>0,09-0,24⁴</i>	0,11-0,28	0,8-1,4	<i>2,85-12,73</i>	950-1038
[2]	<i>0,22</i>	0,26	2-2,5	<i>7,69-62</i>	
[16]	<i>0,26-0,35</i>	0,3-0,41	0,31-0,80	<i>0,76-2,67</i>	
[17]	<i>0,11-0,25</i>	0,13-0,29	0,88-0,96	<i>3,03-7,38</i>	
[18]			0,1-0,67		
[19]			0,2-0,47		
[20]				2	1123
[21]				2,5-3,8	817-947
[22]				0,9-4,5	867-1050
[23]				4-5	
[24]					927-1227
[25]					900-1050
[3]					1000
[2]					900-950
[26]					957-1017
Rango	0,2-0,40	0,11-0,41	0,1-1,4	0,9-5	817-1227

¹ Para datos de kg vapor/kg Fuel a kg vapor/kg C, se a estimado una composición del 42% de Carbón.

² En cursiva datos obtenidos a en base a ER con 42% C, 3% H, 6% O, 1% S y 48% de cenizas. (ER*1,169)

³ En cursiva datos obtenidos a partir de de Ratios (Vapor/C)/(O₂/C) molar

⁴ En cursiva datos obtenidos a partir de O₂/C, idem 2 (ER/1,169).

El rango de operación de OC se encuentra entre 0,11 y 0,41. En caso de utilizar la variable OC (gasificación con oxígeno) se evita el uso de ER, además se restringe el rango entre 0,15 y 0,40 al eliminar el máximo y mínimo de la serie. Se realizan tres simulaciones con valores de: 0,15; 0,30 y 0,40.

Los valores de SC, para gasificación con vapor se hallan entre 0,10 y 1,40. Como el caso anterior, se eliminan los valores extremos de la serie y se realizan cuatro simulaciones entre 0,20 y 1,10 con un paso de 0,30. El parámetro SC se utiliza para ambas simulaciones.

En este punto el modelo de simulación se subdivide en dos submodelos, en función de la combinación de agentes utilizados:

- a) modo 1, para la simulación de gasificado con aire y vapor, se tienen 2 variables. El ratio SC con 4 niveles y ER con 3, en total 12 escenarios.
- b) modo 2, para el programa de gasificación con oxígeno y vapor, se simula el ratio OC con 3 niveles y SC con 4, totalizando 12 escenarios.

4. Resultados y discusión

Para el caudal de combustible establecido por el diseño del alimentador (1,039 kg/h), el ϕ_p del lecho de 400 μm y la temperatura de reactor estable (850°C) se identifican si todos los escenarios (24) de las simulaciones del caso base de gasificación cumplen los dos requisitos que garantizan la formación de lecho burbujeante: se hallan en régimen burbujeante y están dentro los ratios de operación fluidodinámica estables. Los escenarios se han basado en rangos de operación de SC, OC y ER utilizados en plantas piloto de gasificación existentes, explicadas en el anterior apartado.

Realizadas las 24 simulaciones para cada uno de los escenarios de gasificación (con vapor, oxígeno o aire) se han determinado por orden de importancia las características para considerar que el escenario es aceptable en términos de fluidización, los siguientes parámetros:

- Los valores característicos de d^* y U^* que nos permiten hallar el régimen de fluidización burbujeante mediante el diagrama de Grace.
- Determinar U_{mf} , U_g y U_t con las que se calculan los ratios aconsejables de operación del gasificador U_g/U_{mf} mayor a 3,5 y U_t/U_{mf} entre 10-90 veces, además de verificar que U_g es menor a U_t .

La tabla 5 y 6 presenta los resultados de modelo base, la columna 'Régimen' identifica la característica del fluido en base al diagrama de Grace (burbujeante o no burbujeante) y a continuación se calculan los ratios de operación (crítico, límite y estable).

Para el 1^{er} modo de gasificación con aire y vapor, se identifican que los primeros tres escenarios con ER de 0,20 no alcanzan los ratios mínimos de operación en lecho fluido (U_g/U_{mf} y U_t/U_{mf}), básicamente por falta de fuerza de arrastre debido al reducido caudal de aire. Por otra parte, para los seis primeros escenarios (ER <0,30 y SC <0,50) el régimen burbujeante no es alcanzado. A partir del 7^{mo} escenario se tiene un régimen de fluidización burbujeante estable.

Para el 2^{do} modo, con gasificantes oxígeno y vapor, todos los escenarios presentan régimen no burbujeante y los ratios mínimos de fluidización no se alcanzan para los escenarios donde SC es menor a 0,80; a partir de este ratio se tiene parámetros de fluidización límite, pero en ningún caso estable. Esta baja capacidad fluidodinámica, se debe principalmente al reducido caudal de oxígeno necesario para gasificar el carbón que disminuye la U_g , que difícilmente llega a duplicar la U_{mf} .

En la práctica, es más adecuado que el escenario se halle dentro el régimen burbujeante del diagrama de Grace, por encima de los ratios de parámetros de fluidización U_g/U_{mf} y U_t/U_{mf} . Por lo tanto, es mejor estar dentro régimen, aumentando U_g/U_{mf} por encima de 3,5 y controlando que U_g no supere U_t .

A partir de los resultados de las diferentes simulaciones, se proponen cinco alternativas para mejorar la capacidad fluidodinámica de las simulaciones que no alcanzaron el régimen burbujeante, pero manteniendo siempre los rangos de SC, OC y ER de bibliografía. Los datos de las tablas siguientes están expresadas en IN/min para los caudales de aire, oxígeno, vapor e inerte y en kJ/kg para el PCI.

4.1. Reducción del ϕ_p

Reducción del ϕ_p del lecho por debajo de los 400 μm , el inconveniente es el incremento de energía en el proceso de molienda, sin embargo el PCI del gas de salida se mantiene.

Tabla 5

Resultados de la simulación con aire y vapor

Modo1: aire+vapor			Resultados										
Temp	SC	ER	d*	U*	Régimen	Umf	Ug	Ut	aire (l/min)	vapor (l/min)	Ug/Umf	Ut/Umf	PCI
850	0,2	0,2	6,48	0,1	No burbujeante	0,1	0,29	4,66	8,98	2,1	2,9	46,6	10.668
850	0,5	0,2	6,48	0,12	No burbujeante	0,11	0,32	4,67	8,99	5,26	2,9	42,5	8.754
850	0,8	0,2	6,46	0,13	No burbujeante	0,11	0,35	4,68	8,99	8,41	3,2	42,5	7.310
850	1,1	0,2	6,43	0,14	No burbujeante	0,1	0,38	4,69	8,99	11,56	3,8	46,9	6.196
850	0,2	0,3	6,51	0,13	No burbujeante	0,1	0,34	4,41	13,48	2,1	3,4	44,1	6.116
850	0,5	0,3	6,51	0,14	No burbujeante	0,1	0,37	4,44	13,48	5,26	3,7	44,4	5.201
850	0,8	0,3	6,48	0,15	Burbujeante	0,1	0,4	4,46	13,48	8,41	4,0	44,6	4.476
850	1,1	0,3	6,45	0,16	Burbujeante	0,1	0,43	4,48	13,48	11,56	4,3	44,8	3.893
850	0,2	0,4	6,53	0,15	Burbujeante	0,1	0,39	4,25	17,98	2,1	3,9	42,5	3.714
850	0,5	0,4	6,52	0,17	Burbujeante	0,1	0,42	4,29	17,98	5,26	4,2	42,9	3.236
850	0,8	0,4	6,49	0,18	Burbujeante	0,1	0,45	4,31	17,98	8,41	4,5	43,1	2.844
850	1,1	0,4	6,46	0,19	Burbujeante	0,1	0,48	4,33	17,98	11,56	4,8	43,3	2.520

Crítico	Velocidad de fluidización menor a 2,5 veces la Umf
Límite	Velocidad de fluidización entre 2,5 y 3,5 veces la Umf
Estable	Velocidad de fluidización mayor a 3,5 veces la Umf

* Todas las relaciones de U_i y U_{mf} están entre 10-90 veces.

** Caudales de oxígeno, aire y vapor en condiciones normales l/min.

*** PCI en kJ/kg.

Tabla 6

Resultados de la simulación con oxígeno y vapor

Modo2: oxígeno+vapor					Resultados								
Temp.	SC	OC	d*	U*	Régimen	U _{mf}	U _g	U _t	oxígeno (l/min)	vapor (l/min)	U _g /U _{mf}	U _t /U _{mf}	PCI
850	0,2	0,15	6,31	0,06	No burbujeante	0,12	0,19	5,44	1,17	2,1	1,6	45,3	37.135
850	0,5	0,15	6,36	0,07	No burbujeante	0,12	0,22	5,35	1,17	5,26	1,8	44,6	26.382
850	0,8	0,15	6,36	0,08	No burbujeante	0,11	0,25	5,28	1,17	8,41	2,3	48,0	19.700
850	1,1	0,15	6,34	0,09	No burbujeante	0,11	0,29	5,21	1,17	11,56	2,6	47,4	15.269
850	0,2	0,3	6,44	0,06	No burbujeante	0,11	0,19	5,06	2,34	2,1	1,7	46,0	26.772
850	0,5	0,3	6,44	0,07	No burbujeante	0,11	0,22	5,02	2,34	5,26	2,0	45,6	19.560
850	0,8	0,3	6,42	0,09	No burbujeante	0,11	0,26	4,99	2,34	8,41	2,4	45,4	14.907
850	1,1	0,3	6,38	0,10	No burbujeante	0,11	0,29	4,96	2,34	11,56	2,6	45,1	11.735
850	0,2	0,4	6,51	0,07	No burbujeante	0,11	0,19	4,84	3,13	2,1	1,7	44,0	21.530
850	0,5	0,4	6,49	0,08	No burbujeante	0,11	0,22	4,83	3,13	5,26	2,0	43,9	15.961
850	0,8	0,4	6,44	0,09	No burbujeante	0,11	0,26	4,82	3,13	8,41	2,4	43,8	12.299
850	1,1	0,4	6,4	0,10	No burbujeante	0,11	0,29	4,81	3,13	11,56	2,6	43,7	9.765

Crítico	Velocidad de fluidización menor a 2,5 veces la U _{mf}
Límite	Velocidad de fluidización entre 2,5 y 3,5 veces la U _{mf}
Estable	Velocidad de fluidización mayor a 3,5 veces la U _{mf}

* Todas las relaciones de U_t y U_{mf} están entre 10-90 veces.

** Caudales de oxígeno, aire y vapor en condiciones normales l/min.

*** PCI en kJ/kg.

La reducción del ϕ_P implica una reducción de la superficie específica de contacto del gas con las partículas de sólido inerte, pero esta no es proporcional, por lo que se obtiene una fuerza de empuje adicional que mejorará los índices de fluidización. Se modelizo el comportamiento con ϕ_P de 300 μm , el resultado para el modo 1, con gasificación aire y vapor se logra que todos los escenarios presenten un comportamiento estable en los parámetros de fluidización U_g/U_{mf} y U_t/U_{mf} ; sin embargo los dos primeros escenarios ($SC=0,2-0,5$ y $ER=0,2$) continúan con régimen no burbujeante (NB), ver tabla 7.

Tabla 7

Resultados de la simulación con aire y vapor a ϕ_P de 300 μm

Modo1: aire+vapor				Resultados							
SC	ER	d*	U*	Régimen	Umf	Ug	Ut	aire	vapor	Ug/Umf	Ut/Umf
0,2	0,2	4,86	0,1	NB	0,07	0,29	3,49	8,98	2,1	4,1	49,9
0,5	0,2	4,86	0,12	NB	0,07	0,32	3,51	8,99	5,26	4,6	50,1
0,8	0,2	4,85	0,13	B	0,07	0,35	3,51	8,99	8,41	5,0	50,1
1,1	0,2	4,82	0,14	B	0,07	0,38	3,51	8,99	11,56	5,4	50,1
0,2	0,3	4,89	0,13	B	0,06	0,34	3,31	13,48	2,1	5,7	55,2
0,5	0,3	4,88	0,14	B	0,06	0,37	3,33	13,48	5,26	6,2	55,5
0,8	0,3	4,86	0,15	B	0,06	0,4	3,35	13,48	8,41	6,7	55,8
1,1	0,3	4,84	0,16	B	0,06	0,43	3,36	13,48	11,56	7,2	56,0
0,2	0,4	4,9	0,15	B	0,06	0,39	3,19	17,98	2,1	6,5	53,2
0,5	0,4	4,89	0,17	B	0,06	0,42	3,21	17,98	5,26	7,0	53,5
0,8	0,4	4,87	0,18	B	0,06	0,45	3,23	17,98	8,41	7,5	53,8
1,1	0,4	4,85	0,19	B	0,06	0,48	3,25	17,98	11,56	8,0	54,2

El modo 2 presenta variaciones con el ϕ_P , ya que los siete escenarios que presentaban parámetros de fluidización (U_g/U_{mf} y U_t/U_{mf}) críticos pasa a situación límite; pero en ningún caso se logra alcanzar el régimen burbujeante (B) del diagrama de Grace. Los resultados del modo 2 se hallan en el anexo G (Tabla G.1, Anexo G).

Las variaciones en ϕ_P contribuyen a mejorar los parámetros de fluidización, logrando en la mayoría de los casos entrar en rangos estables de U_g/U_{mf} y U_t/U_{mf} . Pero esto no es suficiente para lograr que los escenarios con regímenes burbujeantes alcancen el burbujeo explicado en el diagrama de Grace.

El ϕ_P requerido para que todos los escenarios del modo 1 con aire y vapor se encuentren dentro el régimen burbujeante es de 200 μm . Para le modo 2, este diámetro se reduce aún más y llega a 130 μm . Ambos diámetros solo representan una solución teórica para el fenómeno de la fluidización, debido a que esta granulometría pertenece a centrales de carbón pulverizado.

4.2. Gasificación con inerte

La utilización de gases inertes que permitan entrar en régimen burbujeante sin tomar parte en las reacciones de gasificación son comunes en procesos donde se involucran aspectos de fluidización. El inconveniente principal es la reducción del PCI del gas de salida y el costo adicional del gas inerte. Los caudales de inerte se eligen con la condición de que no sean superiores al del aire u oxígeno y nos permitan analizar su impacto sobre las características de fluidización y el PCI.

El PCI se reduce de manera proporcional a la inyección de gas inerte, en nuestro caso la reducción se halla entre el 48-56%, por ejemplo para el 1^{er} escenario, el PCI del caso básico es de 10.668 kJ/kg y al inyectarse gas inerte en una proporción de 75% del volumen de ER, el PCI se reduce hasta 4.743 kJ/kg.

Para el modo 1, donde los agentes gasificantes son aire, vapor e inerte; se inyecta adicionalmente entre el 65-75% del volumen de ER en gas inerte. Los resultados muestran que los parámetros de fluidización se cumplen al 100% y únicamente el primer escenario (SC=0,2 y ER=0,2) no cumple el régimen burbujeante del diagrama de Grace.

Tabla 8

Resultados de la simulación con aire, vapor e inerte

Modo1: aire+vapor+inerte					Resultados								
SC	ER	d*	U*	Régimen	Umf	Ug	Ut	aire	vapor	inerte	Ug/Umf	Ut/Umf	PCI
0,2	0,2	6,52	0,14	NB	0,1	0,36	4,32	8,98	2,1	6,75	3,6	43,2	4.743
0,5	0,2	6,51	0,15	B	0,1	0,39	4,36	8,99	5,26	6,74	3,9	43,6	4.087
0,8	0,2	6,49	0,16	B	0,1	0,42	4,38	8,99	8,41	6,74	4,2	43,8	3.557
1,1	0,2	6,46	0,17	B	0,1	0,46	4,4	8,99	11,56	6,74	4,6	44,0	3.125
0,2	0,3	6,54	0,18	B	0,1	0,43	4,14	13,48	2,1	8,99	4,3	41,4	2.926
0,5	0,3	6,52	0,19	B	0,1	0,47	4,17	13,48	5,26	8,99	4,7	41,7	2.574
0,8	0,3	6,49	0,2	B	0,1	0,5	4,2	13,48	8,41	8,99	5,0	42,0	2.281
1,1	0,3	6,46	0,21	B	0,1	0,53	4,22	13,48	11,56	8,99	5,3	42,2	2.036
0,2	0,4	6,55	0,22	B	0,09	0,51	4,01	17,98	2,1	11,23	5,7	44,6	1.826
0,5	0,4	6,52	0,23	B	0,09	0,54	4,04	17,98	5,26	11,23	6,0	44,9	1.631
0,8	0,4	6,49	0,24	B	0,09	0,57	4,07	17,98	8,41	11,23	6,3	45,2	1.466
1,1	0,4	6,47	0,25	B	0,09	0,6	4,09	17,98	11,56	11,23	6,7	45,4	1.324

Para el modo 2, donde los agentes gasificantes son oxígeno, vapor e inerte, se introduce adicionalmente entre el 38-50% del volumen de OC en forma de gas inerte. Los resultados no varían comparados con el caso base, porque el volumen inyectado de gas inerte es demasiado bajo. Probablemente el caudal óptimo de gas inerte requerido para obtener parámetros de fluidización estables se halle muy por encima de la suma del caudal de oxígeno y vapor (Ver tabla G.2, Anexo G).

El uso de gas inerte es una opción aceptable cuando se trata de gasificación con aire y vapor, debido al uso primario del gas producto, además porque su volumen relativo en la mezcla de agentes gasificantes es menor al 50%; sin embargo cuando la gasificación se realiza con oxígeno y vapor, se requiere grandes cantidades de gas inerte, convirtiéndose este en el 1^{er} agente gasificante (>50%) en función al caudal, con la consecuente reducción proporcional del PCI del gas resultante.

Para el único escenario del modo 1 que no alcanza el régimen burbujeante, es necesario inyectar adicionalmente el 100% del volumen de ER en gas inerte para ingresar en el régimen. Para el modo 2, donde ningún escenario alcanza el régimen burbujeante, es necesario para el peor escenario (SC=0,2 y OC=0,15) 32 veces el ratio OC en forma de gasificante inerte, o lo que igual 37,44 IN/min de gas inerte. Esta solución es de aplicación numérica porque el PCI se reduce por debajo de 250 kJ/Kg.

4.3. Incrementar caudal de vapor

Otra opción es incrementar el caudal de vapor por encima de la referencia bibliográfica, con la consecuente formación adicional de H₂ y CO; además de un límite máximo sobre ratio molar de 3 antes de desactivar el proceso de gasificación [2]. Se calcula con SC mayor a 1,1 (tres escenarios: 1,6-2,1-2,6), los resultados muestran rangos de fluidización (U_g/U_{mf} y U_t/U_{mf}) óptimos para todos los escenarios del modo de gasificación aire y vapor, además de haber alcanzado en todos los casos el régimen burbujeante.

Tabla 9

Resultados de la simulación con aire y vapor (SC>1,6)

Modo1: aire+vapor				Resultados								
SC	ER	d*	U*	Régimen	U _{mf}	U _g	U _t	aire	vapor	U _g /U _{mf}	U _t /U _{mf}	PCI
1,6	0,2	6,38	0,15	B	0,1	0,44	4,68	8,99	16,82	4,4	46,8	4.832
2,1	0,2	6,33	0,17	B	0,1	0,49	4,68	8,99	22,08	4,9	46,8	3.873
2,6	0,2	6,28	0,19	B	0,1	0,54	4,67	8,99	27,33	5,4	46,7	3.174
1,6	0,3	6,4	0,18	B	0,1	0,48	4,5	13,48	16,82	4,8	45,0	3.146
2,1	0,3	6,35	0,2	B	0,1	0,54	4,51	13,48	22,08	5,4	45,1	2.595
2,6	0,3	6,3	0,21	B	0,1	0,59	4,52	13,48	27,33	5,9	45,2	2.178
1,6	0,4	6,41	0,2	B	0,1	0,53	4,36	17,98	16,82	5,3	43,6	2.090
2,1	0,4	6,36	0,22	B	0,1	0,59	4,38	17,98	22,08	5,9	43,8	1.762
2,6	0,4	6,31	0,24	B	0,1	0,64	4,4	17,98	27,33	6,4	44,0	1.506

Para las simulaciones con oxígeno y vapor se utilizan los mismos rangos de SC, se observa que para los escenarios donde SC es mayor que 1,6 se alcanzan los parámetros de fluidización estables. Pero solo cuando el ratio SC está por encima de 2,6

se halla el régimen burbujeante. De esta manera se confirma la habilitación (fluidización) de la mayor parte de los escenarios donde existían parámetros críticos de fluidización y regímenes no burbujeantes.

Tabla 10

Resultados de la simulación con oxígeno y vapor (SC>1,6)

Modo2: oxígeno+vapor					Resultados							
SC	OC	d*	U*	Régimen	U _{mf}	U _g	U _t	O ₂	vapor	U _g /U _{mf}	U _t /U _{mf}	PCI
1,6	0,15	6,29	0,11	NB	0,11	0,34	5,12	1,17	16,82	3,1	46,5	10.615
2,1	0,15	6,24	0,13	NB	0,11	0,39	5,05	1,17	22,08	3,5	45,9	7.806
2,6	0,15	6,19	0,14	B	0,11	0,44	5	1,17	27,33	4,0	45,5	5.982
1,6	0,3	6,31	0,11	NB	0,11	0,34	4,91	2,34	16,82	3,1	44,6	8.314
2,1	0,3	6,25	0,13	NB	0,11	0,39	4,87	2,34	22,08	3,5	44,3	6.197
2,6	0,3	6,2	0,15	B	0,1	0,44	4,84	2,34	27,33	4,4	48,4	4.797
1,6	0,4	6,32	0,12	NB	0,11	0,34	4,78	3,13	16,82	3,1	43,5	6.993
2,1	0,4	6,26	0,13	NB	0,1	0,39	4,76	3,13	22,08	3,9	47,6	5.254
2,6	0,4	6,2	0,15	B	0,1	0,45	4,74	3,13	27,33	4,5	47,4	4.091

El incremento de vapor en la gasificación produce una reducción proporcional en el PCI del gas resultante, ejemplo de ello es el escenario ER de 0,4 y SC de 1,1 con un PCI de 2.520 kJ/kg que se ve incrementado en el ratio de vapor SC a 2,6 muestra un descenso en el poder calorífico del 40% (1.506 kJ/kg), con comportamiento similar en el modo 2.

El ratio límite de vapor necesario para que todos los escenarios del modo 1 se hallen en régimen burbujeante es de SC igual a 1,3 que se encuentra dentro el rango hallado en bibliografía. Para el modo 2, el ratio SC necesario para alcanzar régimen burbujeante es de 2,6 y se halla por encima del rango hallado en experiencias de plantas piloto (ver tabla 4), sin embargo P. Basu [2] indica que es posible gasificar con ratios SC límite de 3, ya que por encima de este se desactiva el proceso de gasificación. Por otra parte Probststein [27], indica que es posible gasificar carbón con ratios molares de SC entre 2,0 y 2,5 evitando dejar el reactor sin reaccionar.

4.4. Incrementar la temperatura del reactor

Al incrementar la temperatura del reactor de 850 a 950 °C, se aumenta la viscosidad del agente gasificante y al mismo tiempo se reduce la densidad del gas resultante, mejorando ligeramente las condiciones fluidodinámicas en el interior. Para el modo 1, con aire y vapor, el incremento de 100 °C en la temperatura del reactor es capaz de aumentar entre 8 y 10% la U_g, manteniendo casi constantes U_{mf} y U_t. Sin embargo los

regímenes continúan iguales al escenario base. Las tablas con los resultados, se hallan en el anexo G (Tabla G.3 y G.4, Anexo G).

Similares resultados se hallan en el modo 2, con oxígeno y vapor, sin embargo esta mejora en la U_g , no es suficiente para ingresar a régimen burbujeante en ninguno de los escenarios. El incremento de temperatura en el reactor mejora ligeramente las condiciones de fluidización del modo 2, entre un 7 a 11% la U_g por cada 100°C, sin embargo para nuestro modelo es insuficiente y los escenarios se mantienen invariables. La temperatura no tiene influencia perceptible en el PCI del gas producido.

El modo 1, requiere una temperatura de reactor de 1.450°C para que todos sus escenarios alcancen el régimen burbujeante; no ocurre lo mismo con el modo 2, del cual no es posible alcanzar la temperatura (límite de cómputo) para que todos los escenarios ingresen en régimen burbujeante. Esta alternativa también es numérica debido a que nuestra planta piloto no es capaz de alcanzar estas temperaturas.

4.5. Incrementar el flujo de alimentación de combustible

Como última alternativa, se incrementa en 50% el caudal de combustible hacia el reactor de 1,039 a 1,558 kg/h de carbón; este incremento tiene por objetivo inicial, el de intentar alcanzar el régimen de fluidización burbujeante únicamente para el modo 1. De esta forma se incrementa el requerimiento de agentes gasificantes en ambos modos y se mejoran las características de fluidización. En el modo 1, se observa que todos los escenarios presentan régimen burbujeante y rango de parámetros de fluidización estables.

Tabla 11

Resultados de la simulación con aire y vapor con 1,558 kg/h carbón

Modo1: aire+vapor					Resultados						
SC	ER	d*	U*	Régimen	Umf	Ug	Ut	aire	vapor	Ug/Umf	Ut/Umf
0,2	0,2	6,47	0,16	B	0,1	0,43	4,66	13,48	3,15	4,3	46,6
0,5	0,2	6,48	0,17	B	0,11	0,48	4,67	13,48	7,88	4,4	42,5
0,8	0,2	6,46	0,19	B	0,11	0,53	4,68	13,48	12,61	4,8	42,5
1,1	0,2	6,43	0,21	B	0,1	0,57	4,69	13,48	17,34	5,7	46,9
0,2	0,3	6,51	0,2	B	0,1	0,51	4,41	20,22	3,15	5,1	44,1
0,5	0,3	6,51	0,21	B	0,1	0,55	4,44	20,22	7,88	5,5	44,4
0,8	0,3	6,48	0,23	B	0,1	0,6	4,46	20,22	12,61	6,0	44,6
1,1	0,3	6,45	0,24	B	0,1	0,65	4,48	20,22	17,34	6,5	44,8
0,2	0,4	6,53	0,23	B	0,1	0,58	4,25	26,96	3,15	5,8	42,5
0,5	0,4	6,52	0,25	B	0,1	0,63	4,29	26,96	7,88	6,3	42,9
0,8	0,4	6,49	0,26	B	0,1	0,67	4,31	26,96	12,61	6,7	43,1
1,1	0,4	6,46	0,28	B	0,1	0,72	4,33	26,96	17,34	7,2	43,3

El modo 2 presenta sustanciales mejoras, ya que solo presenta un escenario con parámetro crítico de fluidización comparados con los 7 del escenario base. El régimen burbujeante es alcanzado siempre y cuando el ratio SC sea mayor a 1,1. El PCI no tiene variación alguna al incremento de caudal.

Tabla 12

Resultados de la simulación con oxígeno y vapor con 1,558 kg/h carbón

Modo2: oxígeno+vapor					Resultados						
SC	OC	d*	U*	Régimen	Umf	Ug	Ut	O2	vapor	Ug/Umf	Ut/Umf
0,2	0,15	6,31	0,09	NB	0,12	0,29	5,44	1,76	3,15	2,4	45,3
0,5	0,15	6,36	0,10	NB	0,12	0,33	5,35	1,76	7,88	2,8	44,6
0,8	0,15	6,36	0,12	NB	0,11	0,38	5,28	1,76	12,61	3,5	48,0
1,1	0,15	6,34	0,14	B	0,11	0,43	5,21	1,76	17,34	3,9	47,4
0,2	0,3	6,44	0,10	NB	0,11	0,29	5,06	3,52	3,15	2,6	46,0
0,5	0,3	6,44	0,11	NB	0,11	0,34	5,02	3,52	7,88	3,1	45,6
0,8	0,3	6,42	0,13	NB	0,11	0,38	4,99	3,52	12,61	3,5	45,4
1,1	0,3	6,38	0,14	B	0,11	0,43	4,96	3,52	17,34	3,9	45,1
0,2	0,4	6,51	0,10	NB	0,11	0,29	4,84	4,69	3,15	2,6	44,0
0,5	0,4	6,49	0,12	NB	0,11	0,34	4,83	4,69	7,88	3,1	43,9
0,8	0,4	6,44	0,13	NB	0,11	0,38	4,82	4,69	12,61	3,5	43,8
1,1	0,4	6,4	0,15	B	0,11	0,43	4,81	4,69	17,34	3,9	43,7

El aumento del caudal de combustible para el diseño utilizado es la variable que tiene el efecto más importante en los parámetros fluidodinámicos, ya que el incremento del 50% en el flujo de combustible permite que todos los escenarios del modelo de gasificación con aire y vapor se hallen dentro de rango, y también gran parte de los escenarios con oxígeno y vapor.

El modo 1, gasificación con aire y vapor, solo es necesario 1,450 kg/h para que todos los escenarios ingresen en el régimen burbujeante. El modo 2, requiere un caudal de 2,600 kg/h para que el peor escenario (SC=0,2 y OC=0,15) se halle en el régimen.

A partir de los resultados obtenidos con las cinco alternativas para mejorar la fluidización del gasificador, se construye un escenario combinando dos de las alternativas con mayor efecto en la fluidización de las partículas, el uso de dos alternativas simultaneas se debe a que las alternativas independientes son inviables para permitir que todos los escenarios simulados se hallen dentro el régimen burbujeante del diagrama de Grace. Evaluando cada una de las alternativas se rechazan:

- la reducción de ϕ_p , debido a la ligera ganancia marginal en los parámetros de fluidización y el alto costo adicional de molienda.

- el incremento de la temperatura de reacción, que presenta una pequeña ganancia en U_g a una temperatura inalcanzable por el reactor.
- las necesidades de gases inertes para el escenario límite del modo 2, son diez veces mayores que la suma de oxígeno y vapor; con un descenso del PCI proporcional.

A partir de este análisis se define que el último escenario debe estar compuesto por el incremento del caudal de vapor y el caudal de combustible. Definimos un nuevo límite máximo para el ratio molar SC de 2,6 basándonos en Basu y Probststein [2, 27] que garantice las reacciones de gasificación y un caudal de combustible de 1,558 kg/h¹. El resultado esperado, es conseguir que los escenarios más adversos (gasificación con oxígeno y vapor) consigan alcanzar el régimen de fluidización burbujeante y situarse dentro los rangos de operación estables.

4.6. Incrementar el flujo de alimentación de combustible y ratio de vapor SC

Se incrementa el caudal de alimentación en un 50% (1,558 kg/h) y se aumenta el ratio de vapor SC con rangos de acción entre 1,6 y 2,6. El modo 1, gasificación con aire y vapor mejora todos los parámetros de fluidización y se consigue que los doce escenarios se sitúen en régimen burbujeante.

Tabla 13

Resultados de la simulación aire y vapor con 1,558 kg/h carbón y SC>1,6

Modo1: aire+vapor					Resultados							
SC	ER	d*	U*	Régimen	Umf	Ug	Ut	aire	vapor	Ug/Umf	Ut/Umf	PCI
1,6	0,2	6,38	0,23	B	0,1	0,65	4,68	13,48	25,22	6,5	46,8	4.832
2,1	0,2	6,33	0,26	B	0,1	0,73	4,68	13,48	33,11	7,3	46,8	3.873
2,6	0,2	6,28	0,28	B	0,1	0,81	4,67	13,48	40,99	8,1	46,7	3.174
1,6	0,3	6,4	0,27	B	0,1	0,73	4,5	20,22	25,22	7,3	45,0	3.146
2,1	0,3	6,35	0,3	B	0,1	0,81	4,51	20,22	33,11	8,1	45,1	2.595
2,6	0,3	6,3	0,32	B	0,1	0,88	4,52	20,22	40,99	8,8	45,2	2.178
1,6	0,4	6,41	0,31	B	0,1	0,8	4,36	26,96	25,22	8,0	43,6	2.090
2,1	0,4	6,36	0,33	B	0,1	0,88	4,38	26,96	33,11	8,8	43,8	1.762
2,6	0,4	6,31	0,36	B	0,1	0,96	4,4	26,96	40,99	9,6	44,0	1.506

El modo 2, gasificado con oxígeno y vapor, que presenta los escenarios base más complejos en cuanto a lograr alcanzar el régimen burbujeante del diagrama de Grace, sin embargo se consigue situar los doce escenarios dentro el régimen y todos los

¹ Se mantiene la alternativa del incremento del caudal en 50% para el combustible que se considera como buen dato de partida para alcanzar régimen burbujeante en el modo 1 y como no es suficientemente para alcanzar el régimen en modo 2, nos debemos apoyar en el flujo extra de vapor (SC).

parámetros fluidodinámicos son estables (U_g/U_{mf} y U_t/U_{mf}). El PCI presenta el mismo comportamiento que la alternativa 3 aislada, a mayor caudal de vapor decrece el PCI.

Tabla 14

Resultados de la simulación oxígeno y vapor con 1,558 kg/h carbón y $SC > 1,6$

Modo2: oxígeno+vapor					Resultados							
SC	OC	d*	U*	Régimen	U _{mf}	U _g	U _t	O ₂	vapor	U _g /U _{mf}	U _t /U _{mf}	PCI
1,6	0,15	6,29	0,16	B	0,11	0,51	5,12	1,76	25,22	4,6	46,5	10.615
2,1	0,15	6,24	0,19	B	0,11	0,59	5,05	1,76	33,11	5,4	45,9	7.806
2,6	0,15	6,19	0,21	B	0,11	0,67	5	1,76	40,99	6,1	45,5	5.982
1,6	0,3	6,31	0,17	B	0,11	0,51	4,91	3,52	25,22	4,6	44,6	8.314
2,1	0,3	6,25	0,20	B	0,11	0,59	4,87	3,52	33,11	5,4	44,3	6.197
2,6	0,3	6,2	0,22	B	0,1	0,67	4,84	3,52	40,99	6,1	44,0	4.797
1,6	0,4	6,32	0,18	B	0,11	0,51	4,78	4,69	25,22	4,6	43,5	6.993
2,1	0,4	6,26	0,20	B	0,1	0,59	4,76	4,69	33,11	5,4	43,3	5.254
2,6	0,4	6,2	0,23	B	0,1	0,67	4,74	4,69	40,99	6,1	43,1	4.091

Queda establecido que para permitir que todos los escenarios (modo 1 y 2), en especial para el modo de oxígeno y vapor se hallen en régimen burbujeante y dentro de los rangos de fluidización, es necesario incrementar en 50% el caudal de combustible de entrada y aumentar el ratio SC por encima de 1,6. En este punto vemos conveniente limitar el uso del ratio SC en 1,6; porque a partir de este valor se alcanzan todos los parámetros de fluidización y de régimen para el modo 2. Este nuevo valor de SC, es aún ligeramente superior al rango de bibliografía hallada de plantas piloto, pero se halla dentro los valores aceptados por Basu y Probststein.

Los requerimientos de diseño para garantizar que el gasificador alcance régimen burbujeante en base a los datos de bibliografía son:

- para gasificación oxígeno y vapor: un sistema de generación de vapor con una capacidad de 25,3 IN/min y un sistema de abastecimiento de oxígeno con capacidad de 4,7 IN/min.
- para gasificación aire y vapor: precisa un caudal de aire de 27 IN/min y un sistema de generación de vapor de 25,3 IN/min.

5. Selección de equipos

Definidos los requerimientos de oxígeno y vapor en el capítulo anterior y para poder operar el gasificador en cualquiera de los dos modos, se estima el volumen por ciclo de operación necesario, donde un ciclo de operación tiene una duración de 3 horas de proceso de gasificado.

Tabla 15**Requerimiento de vapor y oxígeno**

Agente gasificante	Caudal IN/min	Volumen por ciclo de operación m³
Vapor	25,3 (0,83 kg/h)	4,56 (2,69 kg)
Oxígeno	4,7	0,85
Aire	27	4,86

Los volúmenes expuestos representan las necesidades de gasificantes en las situaciones más desfavorables en el rango de operación establecido en bibliografía. La selección de quipos se basa en la capacidad de suministro indicada en la tabla anterior más un coeficiente de seguridad para asegurar el aprovisionamiento.

Para el suministro de vapor, se selecciona un generador eléctrico de vapor de baja capacidad Sussman con regulador de presión integrado y las siguientes características:

Tabla 16**Generador de vapor**

Especificaciones	
Modelo	Sussman MBA 3kW
Presión de operación (bar)	1-7
Potencia (kW)	3
Producción de vapor (kg/h)	4,5
Dimensiones W*H*D (cm)	52*46*40
Precio FOB (€)	1890

Los cilindros y reguladores de oxígeno están normalizados por volumen y presión de operación, para la planta piloto se selecciona el cilindro de acero inoxidable suministrado por la empresa Linde de uso generalizado en laboratorios de la Universidad:

Tabla 17**Cilindro y regulador de oxígeno**

Especificaciones	
Modelo de cilindro	3AA2400
Capacidad (litr)	49,5
Presión de servicio (bar)	165
Presión máxima de prueba (bar)	230
Dimensiones H*D (cm)	22,86*139,7
Peso en vacío (kg)	61,3
Regulador de presión	CGA540

Rango de flujo regulador(lN/min)	0,12-25
Precio regulador FOB (€)	24

Con la capacidad del cilindro, es posible realizar 9 ciclos de gasificado, cada uno de 3 horas. La elección de un tanque de mayor capacidad atenderá a justificantes de un elevado número de experimentaciones por mes o reducción en el recambio de cilindros.

El anexo H, recoge las características de catalogo del generador de vapor y del cilindro de oxígeno.

El laboratorio del CIRCE ya cuenta con una compresora de aire capaz de suministrar el caudal necesario de aire a la planta piloto, por lo que no se selecciona otro equipo.

6. Conclusiones

Se ha realizado el estudio y sugerido la adaptación de la planta piloto de gasificación en lecho fluido burbujeante de 10 kW_{th} para carbones de bajo rango, se estudio el rango de condiciones de operación para la gasificación utilizando vapor, oxígeno o aire como agente gasificante, y se han determinando caudales de entrada, temperatura de operación y se estimo ratios óptimos de funcionamiento mediante la aplicación de herramientas de simulación, garantizando de esta manera la capacidad fluidodinámica. A partir de los caudales de agentes gasificantes se propone un grupo generador de vapor y un sistema de abastecimiento de oxígeno.

Se han definido los dos parametros más importantes para identificar un regimen burbujeante: la región acotada de flujo burbujeante del diagrama de Grace (d^* y U^*) y a los parametros mínimos de fluidización (U_g/U_{mf} y U_t/U_{mf}). A partir de ratios de gasificantes (ER, SC y OC) hallados en bibliografía de plantas piloto existentes, se han simulado 24 posibles escenarios de operación; la mayor parte de los escenarios no encajaba en el regimen burbujeante, por lo que se presento 5 alternativas para mejorar la fluidización: reducción de ϕ_p , utilización de gases inertes, mayor temperatura del reactor, incremento del ratio SC y aumentar el caudal de combustible. Las cinco alternativas mejoran los parametros de fluidización, pero solo el incremento del ratio SC y caudal de combustible permite alcanzar el regimen burbujeante del diagrama contacto gas-solido. Como ultimo escenario, se plantea el uso combinado de las dos alternativas anteriores para permitir que el 100% de las simulaciones se consideren lechos fluidos burbujeantes aplicado a la gasificación de carbón.

La gasificación con aire y vapor, no representa grandes complicaciones, salvo el caso de ER igual a 0,2; donde se debe incrementar el ratio SC por encima de 1,1. El modo 2,

gasificación con oxígeno y aire presenta los escenarios más adversos para la fluidización burbujeante. Para un incremento del caudal de combustible del 50% y un ratio mayor a 1,6 de SC es posible alcanzar el régimen burbujeante del diagrama de Grace en todos los escenarios, pero a costa de reducción en PCI. Los requerimientos mínimos de agentes gasificantes para la planta piloto son:

- generador de vapor con una capacidad de 25,3 IN/min
- oxígeno suministrado a razón de 4,7 IN/min o 846 IN para 3 horas de operación.
- equipo para suministro de aire a 27 IN/min

En función del caudal estimado de oxígeno y vapor se sugiere el uso de un equipo de generación de vapor Sussman MBA 3kW y un suministro de oxígeno por medio de cilindros de gas tipo M2, ambos con reguladores de presión integrados.

Los resultados confirmaron la necesidad de generar sinergias de algunas alternativas, en este caso se desechan las modificaciones que incurren en mayor gasto energético o reducidas ganancias en las características fluidodinámicas del proceso. La alternativa planteada es la de incrementar el caudal de combustible y el ratio SC, de esta manera se consiguen que todos los escenarios del modo 1 y 2 se encuentren en régimen burbujeante y los parámetros de fluidización se hallen en el rango aconsejable para lechos fluidos. Sin embargo es necesario realizar un estudio posterior del costo por unidad energética del gas obtenido.